

Вибір технологій фіторемедіації для очищення різних видів стічних вод

**О. О. Дмитрієва, І. В. Хоренжая, В. П. Василенко, С. М. Осипенко,
Н. О. Телюра, О. С. Ломакіна, Л. В. Мельнік, І. В. Колдоба**

За методом аналізу ієрархій (МАІ) розроблено методичний підхід визначення пріоритетної технології фіторемедіації для очищення стічних вод від населених пунктів. Розроблений підхід дозволяє задіяти експертів муніципальних органів управління населеного пункту, де планується будівництво очисних споруд, до обґрунтування рішень в управлінні екологічною безпекою поверхневих водних об'єктів, розташованих біля зазначених населених пунктів.

Запропоновано критерії (групи факторів), що відображають: вхідні та вихідні параметри системи очищення; обставини, які складаються в місці побудови очисних споруд, та вимоги, які безпосередньо відносяться до технологій фіторемедіації. Експерти різної фахової спрямованості дають власні судження відносно пріоритетності переваг зазначених критеріальних ознак. Багатодисциплінарні судження експертів, які відображають специфічні особливості фіторемедіації та умови майбутнього місця розташування очисних споруд, оброблені за науково обґрунтованою процедурою МАІ, є основою для прийняття рішень при виборі пріоритетної технології фіторемедіації в конкретних умовах.

До переваг методичного підходу, що запропонований, слід віднести можливість ув'язати до єдиного алгоритму обґрунтування рішення весь масив необхідної інформації. Ця інформація розрізняється як за своїм змістом (екологічна, біологічна, містобудівна, соціальна та економічна), так і за формою представлення (дані безпосередніх вимірів, статистичні та прогнозні оцінки).

Апробація запропонованого методичного підходу проводилась на прикладі вибору технологій фіторемедіації для очисних споруд трьох об'єктів різного виду: промислового підприємства, житлової забудови та міської лікарні. Отримані результати мали рівень узгодженості в межах допустимого, що свідчить про їх достовірність.

Розроблений методичний підхід призначений для прийняття управлінських рішень при виборі технології фіторемедіації на очисних спорудах при обґрунтуванні їх удосконалення чи побудові нових споруд

Ключові слова: екологічна безпека, фіторемедіація та її технології, вищі водні рослини, об'єкти населеного пункту, метод аналізу ієрархій

1. Вступ

Розвиток суспільства – це, крім іншого, історія нарощування споживання води промисловістю, житловим та сільським господарствами. Глобальною екологічною проблемою сучасності стає забруднення водних ресурсів. Вода після її використання скидається у водойми та річки, і майже третина її – без належного очищення.

Основними причинами скидання забруднених стічних вод для більшості країн залишається недостатнє впровадження елементів екологічно безпечного водокористування в частині водовідведення, а також низька ефективність роботи існуючих міських очисних споруд, заснованих на традиційних технологіях очищення. Особливо це відноситься до споруд для очищення побутових стічних вод невеликих населених пунктів (НП) та споруд окремих об'єктів (підприємств, лікарень, житлових масивів, військових об'єктів, тощо). Також це відноситься до очисних споруд великих міст, які експлуатуються в умовах певних складнощів в її енергетичній та економічній сферах і не завжди забезпечують проектну ефективність роботи.

Фактично виникла необхідність для переорієнтування систем очищення з традиційних технологій – на прості в експлуатації, з низькою енергоємністю методи, що базуються на використанні природних процесів самоочищення.

Процеси самоочищення – провідні процеси, які відбуваються у будь-якому водному об'єкті. В результаті дії цих процесів у водній екосистемі підтримується рівновага і знешкоджуються токсичні речовини, що потрапляють різними шляхами до водного середовища. Самоочищення відбувається за допомогою природних хімічних і біологічних процесів, які проходять у фітоценозах вищих водних рослин (ВВР) і за їх участю. Рослини не тільки споживають речовини, розчинені у воді, а і є субстратом для розвитку різноманітної мікрофлори, яка знешкоджує значну частку забруднень, що потрапляють у природні водні об'єкти і таким чином сприяють покращенню якісного складу води.

Фіторе mediaція – комплекс методів очищення води, ґрунтів та, навіть, атмосферного повітря з використанням рослинних угруповань [1, 2]. В даному дослідженні розглядається використання цього методу для очищення води.

Під рослинними угрупованнями розуміється вища водна рослинність (макрофіти), життєдіяльність якої проходить тільки у водному (занурені рослини, плаваючі тощо) або частково у водному середовищі (повітряно-водні рослини тощо). У флорі на широті країн центральної Європи налічують близько 300 видів ВВР, які по різному приймають участь у формуванні якості води. До основних з них відносяться: очерет, рогоз, рдесник, сусак та ін.

Таким чином, очищувальна спроможність очисних споруд (створених штучно або пристосовуючи природні умови) в значній мірі залежить від присутності в їх екосистемі ВВР. Ці рослини стають надійним бар'єром на шляху забруднень, не дозволяючи їм потрапити до річок та озер.

В умовах потрібного енерго- та ресурсозбереження стає актуальним створення методичного підходу для підтримки прийняття управлінських рішень при виборі технології фіторе mediaції для очисних споруд при будівництві їх у конкретному місті розташування. Цей підхід, по-перше, на базі урахування безлічі факторів та критеріїв допоможе вирішити проблему оцінювання кінцевого результату прийнятого рішення. По-друге, при виборі та впровадженні пріоритетних технологій водоочищення, він допоможе провести аналіз альтернатив або визначити ефективність проходження окремих етапів процесу прийняття рішення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботах [1, 2] наведені основні технології фіторемедіації: ботанічні майданчики, біоінженерні споруди та біоплато. При цьому показана тільки їх конструктивна реалізація. Автори не проводять аналіз переваг і недоліків кожної технології, що ускладнює використання наведеної інформації при виборі технології для впровадження в конкретних умовах населених пунктів.

В [3] розглянуто особливості використання рослин (прямо чи опосередковано) для відновлення забрудненого ґрунту або води. Визначено, що метод фіторемедіації став більш економічним, неінвазивним і загальнодоступним способом усунення забруднень навколишнього середовища.

Але невирішеним залишається питання широкого використання фіторемедіації, яке може бути обмежене невеликим ареалом або розміром рослин, що виявляють потенціал відновлення, і недостатніми здібностями місцевих рослин переносити, детоксифікувати і накопичувати забруднюючі речовини. Також потребує розширення перелік критеріїв, які застосовують при виборі відповідної технології фіторемедіації, у відповідності до особливостей місцевості.

У роботі [4], визначено, що при належному плануванні, відновлення шляхом застосування методу фіторемедіації може бути корисним інструментом для покращення якості води природних екосистем на сільськогосподарських територіях. Тут запропоновано методику вибору місць відновлення водно-болотних угідь щодо поліпшення стічних вод із зрошуваних сільськогосподарських земель, що скидаються в річку Флумен (долина річки Ебро, штат Північна Іспанія).

Попереднє дослідження фізичних та хімічних характеристик річки Флумен та її вододілу визначило нітрати ключовою характеристикою якості води з точки зору мінливості даних. Методика складалася з п'яти кроків, які охоплювали науково-технічні, соціальні та економічні критерії. Але невирішеним залишається питання у розробці загального підходу для об'єднання та уніфікації розрізнених методик.

У роботі [5] автори визначають, що хоча 80 % первісної площі було втрачено за минуле тисячоліття, водно-болотні угіддя Європи все ще охоплюють великі території в північній частині континенту. Водно-болотні угіддя Європи цінуються через їх біорізноманіття та екосистемне значення; їх захист та відновлення підтримується Рамсарською конвенцією, директивами ЄС та національним законодавством щодо охорони природи в різних державах. Авторами визначається, що ці дії потрібно посилити, щоб зупинити подальше погіршення стану ресурсу та його багатьох служб. При прийнятті управлінських рішень щодо використання земель та води, треба враховувати екосистемні можливості водно-болотних угідь. Але невирішеним питанням залишається саме вибір оптимальної, альтернативної технології, яка б враховувала природні та соціально-економічні особливості водно-болотних угідь при їх використанні.

Автори у роботі [6] стверджують, що важкі метали є одним із серйозних забруднень навколишнього середовища на сьогоднішній день. Важкі метали надають токсичну дію на здоров'я людини і викликають кілька серйозних захворювань. Для видалення важких металів з навколишнього середовища використовуються декілька методів, але ці методи мають такі обмеження, як висока

вартість, нетривалий час дії, логістичні проблеми та механічна складність. Фіторе mediaція може бути використана як альтернативне рішення для видалення важких металів через його переваги як економічно ефективну та природну технологію, засновану на використанні природних ландшафтних умов та додаткових конструкцій. На основі проведених досліджень авторами визначені кілька рослин, які мають високий потенціал як біоаккумулятор важких металів і можуть використовуватися для процесу фіторе mediaції важких металів. Але не вирішеним залишається питання розробки підходу для вибору відповідного технологічного рішення фіторе mediaції в умовах конкретних населених пунктів.

Забруднення води вважається серйозною проблемою, що відображено в роботі [7] на прикладі Лівану. Навантаження важкими забрудненнями та поживними речовинами, важкими металами та органічними забруднювачами може бути дуже шкідливим для здоров'я людини та шкодити водному життю та екосистемам. Фіторе mediaція в природних та штучно створених водно-болотних угіддях визнана стійким та дуже ефективним методом очищення води. Однак ці перспективні ініціативи супроводжуються дуже обмеженими дослідженнями ролі рослин в процесі рекультивациі та особливостями підходу при застосуванні пріоритетної технології фіторе mediaції.

У роботі [8] автори визначають водно-болотні угіддя як санітарну технологію, яка використовує природні механізми видалення, що забезпечуються рослинністю, ґрунтом та пов'язаними з ними мікробними популяціями. Авторами наведено достатньо великий перелік критеріїв, але не описано, яким чином їх застосовувати при обґрунтуванні управлінського рішення щодо вибору відповідної технології.

У [9] здійснена спроба застосування інтегральної імітаційної моделі фіторе mediaції при прийнятті управлінських рішень на використання природних процесів самоочищення. Це зроблено на прикладі системи водопостачання, а не водовідведення, яка має суттєві особливості. Крім того, зазначена модель не враховує особливості та умови конкретних територій населених пунктів, їх соціальні складові.

Усе це дозволяє стверджувати, що фіторе mediaція може мати суттєві переваги перед традиційними технологіями водоочищення. Однак для повної реалізації їх можливостей необхідно перед проектуванням очисних споруд проводити додаткові дослідження по вибору конкретної технології фіторе mediaції. При цьому необхідно використовувати інформацію різного фахового спрямування: екологічну, біологічну, містобудівну, соціальну та економічну. Тому доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробці методичного підходу, який дозволить урахувати цю інформацію при виборі технології фіторе mediaції для впровадження в конкретному населеному пункті.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – за методом аналізу ієрархій (МАІ) розробити методичний підхід визначення пріоритетної технології фіторе mediaції (ТФ) для очищення різних видів стічних вод (СВ) від промислових, житлових та інших об'єктів населених пунктів.

Досягти мети пропонується шляхом вирішення наступних задач:

- сформувати ієрархічну модель із факторів, які впливають на вибір пріоритетної ТФ, та розкрити порядок її аналізу за МАІ;
- провести апробацію розробленого методичного підходу при визначенні пріоритетної ТФ для характерних об'єктів населеного пункту.

4. Формування ієрархічної моделі із факторів, які впливають на вибір пріоритетної ТФ, та розкриття порядку її аналізу за МАІ

За МАІ пропонується послідовна реалізація трьох етапів [10, 11]:

- 1) формування ієрархічної моделі порівняння елементів задачі;
- 2) побудова експертами для елементів кожного рівня ієрархії матриць порівнянь та визначення для них локальних пріоритетів (вагових коефіцієнтів) елементів, а також розрахунок індексу та відношення узгодженості експертних матриць;
- 3) визначення глобальних пріоритетів елементів кожного рівня, починаючи з другого, розрахунок індексів та відношень узгодженості їх експертних матриць та вибір найкращої технології для впровадження.

Етап 1. Формування ієрархічної моделі порівняння елементів задачі. При формуванні ієрархічної моделі враховувалися наступні критеріальні умови:

- вхідні та вихідні майбутні умови використання технологій фітореMediaції, тобто в яких екологічних та соціальних особливостях довкілля потрібно буде їх експлуатувати;
- географічні, ґрунтово-кліматичні та економічні особливості населеного пункту, де планується використовувати очисні споруди, побудовані за вибраною технологією;
- специфічні вимоги до технологій фітореMediaції як об'єкту дослідження.

Модель включає шість рівнів (рис. 1).

На 1-ому рівні моделі визначена мета: «Підвищення еколого-соціальної безпеки поверхневих водних об'єктів шляхом впровадження технологій фітореMediaції для очищення всіх категорій стічних вод» та відповідно шість ієрархічних рівнів. Враховуються параметри стічних вод, з якими необхідно буде працювати очисним спорудам за вибраною технологією (елементів 2-го рівня):

- V_{x1} – режим руху стічних вод;
- V_{x2} – величина рН, хімічне споживання кисню (ХСК) та біологічне споживання кисню (БСК) у стічних водах;
- V_{x3} – кількість завислих речовин;
- V_{x4} – кількість нафтопродуктів;
- V_{x5} – кількість важких металів;
- V_{x6} – кількість поверхнево-активних речовин (ПАР);
- V_{x7} – кількість бактеріального забруднення;
- V_{x8} – кількість радіоактивних елементів.

На 3-му рівні враховуються вимоги до стану поверхневих водних об'єктів (ПВО), в які будуть надходити стічні води після очищення, та рівень проблем мешканців, що проживають біля водойми і використовують його води. Ці вимоги сформульовані як вихідні умови, які система очищення повинна зберегти (покращити): $V_{их1}$ – водойм господарсько-питного призначення; $V_{их2}$ – водойм

рибогосподарського призначення; V_{ix3} – водойм комплексного призначення; V_{ix4} – умови життєдіяльності мешканців.

Рівні ієрархії

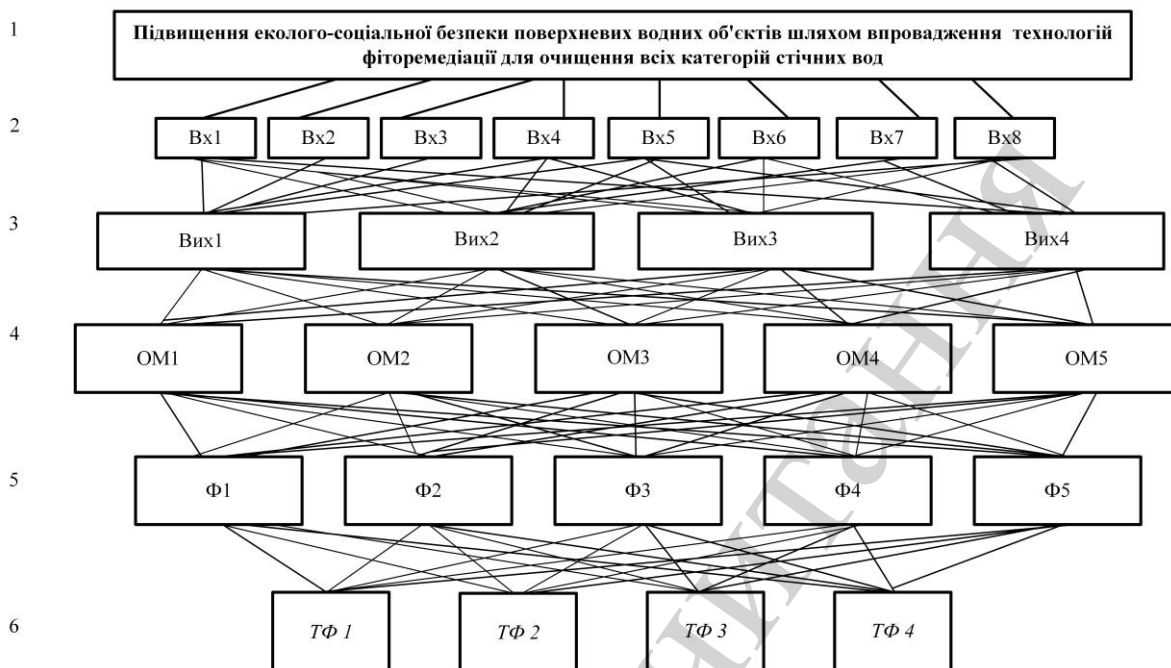


Рис. 1. Ієрархія вибору еколого-соціально безпечної технології фіторемедіації

4-ий рівень – враховує обставини, які складаються у місті, де планується побудувати очисні споруди за вибраною технологією: ОМ1 – наявність вільної площі для будівництва; ОМ2 – наявність ухилу місцевості; ОМ3 – глибина залягання рівня ґрунтових вод; ОМ4 – наявність специфічних умов (заболоченій місцевості з чагарниками ВВР, ярів, озер); ОМ5 – можливості фінансування.

5-ий рівень – це фактори, які безпосередньо впливають на вибір технології фіторемедіації. Вони представлені у вигляді конструктивних та експлуатаційних вимог до технології, що вибирається: Ф1 – доступність ВВР; Ф2 – тривалість роботи впродовж року; Ф3 – динаміка навантаження; Ф4 – вимоги до товщини ґрунтового фільтру в основі; Ф5 – можливість роботи без значних експлуатаційних витрат.

6-ий рівень є останнім – наведені альтернативні варіанти рішення – види технологій фіторемедіації, за якими можуть бути побудовані очисні споруди: ТФ1 – ботанічні майданчики; ТФ2 – біоінженерні споруди; ТФ3 – біоплато; ТФ4 – комбінування технологій.

У табл. 1 наведено характеристика технологій фіторемедіації.

Сформована ієрархічна модель порівняння (рис.1) на кожному рівні ієрархії містить не більше дев'яти елементів для дослідження, що відповідає вимогам [11].

Реалізація етапів 2 та 3 МАІ носить досить формалізований вигляд [10, 11] та має комп'ютерну реалізацію. Тому зауважимо тільки окремі особливості здійснення цих етапів.

Таблиця 1

Характеристика технологій фіторемедіації

Вид технології та її конструктивні особливості	Переваги	Недоліки
<p><i>Ботанічні майданчики</i> [1, 2]. Мілководні акваторії довільної конфігурації з заростями ВВР природного походження площею від декількох до десятків гектарів, що створюються в наявних пониженнях рельєфу місцевості або на спеціально обвалованих територіях.</p>	<p>не потрібно відведення корисних земельних площ; будівництво не потребує істотних капітальних вкладень;</p> <p>працює на протязі кількох десятиліть з мінімальними витратами на експлуатацію (очищення відбувається постійно завдяки існуючому природному біоценозу).</p>	<p>можливість утворення застійних зон та повторного забруднення за рахунок недостатньої керованості процесів очищення; споруда чутлива до динаміки надходження вхідної води із-за недосконалої системи регулювання;</p> <p>ефективність очищення зворотних вод за основними компонентами забруднення нижча, ніж у інших технологіях, так як очищення відбувається лише у поверхнево-му шарі води.</p>
<p><i>Біоінженерні споруди</i> [1, 12]. Очисні споруди, що об'єднують основні елементи споруд ґрунтового очищення з гідробіоценозами біоплато або ставків з посадкою ВВР. Відмінна риса споруд – штучно сформований біоценоз, кількісні та якісні характеристики складових компонентів якого формуються під безпосереднім та опосередкованим впливом ВВР.</p>	<p>високі показники очищення – яке здійснюється як в горизонтальній площині – через зарості ВВР, так і у вертикальній – через прошарок фільтруючої товщі, яка насичена кореневищами рослин, мікрофлорою та водоростями; споруди мають значно більший технічний ресурс, ніж споруди за традиційними технологіями очистки;</p> <p>наявність інженерних засобів регулювання забезпечує: широкий діапазон витрат та складу стічної води на вході до споруд; можливість застосовування в різних кліматичних умовах; має більш стабільні показники очищення впродовж року.</p>	<p>потребує капітальні витрати на будівництво споруд (однак нижчі, ніж на традиційні системи очистки);</p> <p>потребує експлуатаційні витрати на утримання персоналу, якому необхідно забезпечувати проектні показники експлуатації.</p>

Продовження Таблиці 1

<p><i>Біоплато</i> [1, 13]. Складається з одного або декількох фільтраційних та поверхневих блоків, розташованих за ухилом місцевості таким чином, щоб забезпечити самопливний перетік води, що очищається. До складу біоплато можуть бути включені сплановані за ухилом місцевості майданчики (штучні), засаджений ВВР, а також природні ділянки, покриті ВВР, що включені до складу очисних споруд як блоки очищення.</p>	<p>можливість регулювання глибини водного потоку забезпечує придатні умови для очищення вод, кращі показники його ефективності, ніж за технологією ботанічних майданчиків; для її обслуговування можна залучати невелику кількість персоналу, тому буде економія на експлуатаційних витратах у порівнянні з технологією біоінженерних споруд.</p>	<p>сезонність роботи, за рахунок незначної глибини є ймовірність промерзання споруди у зимовий період, що буде знижувати ефективність її очищення; недотримання проектних показників експлуатації може призводити до появи неприємних запахів, накопичення сірководню та інших токсикантів, зниження активності мікроорганізмів, що, в свою чергу, негативно впливає на ефективність очищення стічних вод.</p>
<p><i>Комбінування технологій</i> [2]. Комбінація попередніх технологій у залежності від вхідних та вихідних умов створення споруд фіторе mediaції.</p>	<p>Переваги та недоліки залежать від видів технологій, що комбінуються.</p>	

Етап 2. Побудова експертами для елементів кожного рівня ієрархії матриць порівнянь та визначення для них локальних пріоритетів елементів, а також розрахунок індексу та відношення узгодженості експертних матриць.

Особливості здійснення етапу:

– для побудови матриць порівнянь по елементах кожного рівня ієрархії необхідно залучати групу експертів. Це спеціалісти екологічного, містобудівельного, соціального, економічного спрямування муніципальних органів управління конкретного НП, промислових, житлових та військових об'єктів, де планується будівництво очисних споруд. Експерти за своїм профілем (рис. 1), формують квадратну зворотносиметричну матрицю суджень. Ці матриці є основою для реалізації етапу 2;

– при формуванні зазначених матриць пропонується використовувати класичну шкалу перетворення судження експерта у значення коефіцієнта вагомості першої ознаки відносно другої, де ці коефіцієнти змінюються від 1 до 9 [11].

Етап 3. Визначення глобальних пріоритетів елементів кожного рівня, починаючи з другого, розрахунок індексів та відношень узгодженості їх експертних матриць та вибір найкращої технології для впровадження.

Особливість здійснення етапу – розрахунок локальних та глобальних пріоритетів (вагових коефіцієнтів) елементів, а також визначення індексу та відношення узгодженості відповідних експертних матриць необхідно здійснювати з точністю 0,001 як рекомендовано за [11].

Отже, вибраний варіант технології фіторемедіації для впровадження буде найкращим з позицій особливостей довкілля, населеного об'єкту, де вона буде експлуатуватися, а також специфічних вимог, що пред'являються до даного виду технологій. Крім того, слід відмітити, що при виборі варіанту можливо використовувати інформацію різного типу: даних безпосередніх вимірів, прогнозні та експертні оцінки.

5. Апробація розробленого методичного підходу при визначенні пріоритетної ТФ для характерних об'єктів населеного пункту.

Розглянемо приклади використання розробленого методичного підходу для вибору ТФ на 3 українських об'єктах: підприємстві ТОВ «Схід-Руда», м. Жовті Води; житлової забудови, с. Нова Гусарівка, Харківської обл.; міської лікарні, м. Золочів, Харківської обл. Кожен з об'єктів дослідження має свої специфічні особливості: за параметрами стічних вод, наявності вільної площі для будівництва, умов життєдіяльності мешканців, тощо. Наприклад, за параметрами стічних вод для об'єктів характерне наступне:

- на промисловому підприємстві – найбільш інтенсивний рух стічних вод, підвищені кількісні значення рН, ХСК і БСК та радіоактивності;
- для житлової забудови – значні величини рН, ХСК і БСК, нафтопродуктів та звислих речовин;
- для міської лікарні – наявність інфекційного відділення призводить до бактеріального забруднення.

Завданням дослідження по кожному об'єкту є:

- вибір пріоритетної ТФ для впровадження на конкретному об'єкті;
- проведення аналізу пріоритетів елементів рішення по спадним рівнями ієрархії, що дозволяє зрозуміти, як отримано те або інше значення цих рішень. Результати цього аналізу необхідні у випадку здійснення варіювання параметрами очисних споруд при їх проектуванні.

При дослідженні об'єктів були реалізовані всі три етапи МАІ, основою їх реалізації стала ієрархія, яка наведена на рис. 1. В якості експертів були залучені спеціалісти відповідних міських рад та об'єктів. У табл. 2–6 наведені проміжні результати їх роботи на різних рівнях ієрархії.

Усі розрахунки проводилися на ПЕОМ з точністю 0,001, що рекомендовано за [10, 11], з використанням відповідних команд в середовищі МАІ (MPriority 1,0).

На основі проведених розрахунків по об'єктах, що досліджувались, для кожного варіанту ТФ розраховане кількісне значення глобального пріоритету.

По найбільшому значенню цього показника пропонується варіант ТФ, який рекомендується до впровадження на відповідному об'єкті (рис. 2–4).

Результати розрахунків для підприємства ТОВ «Схід-Руда», м. Жовті Води представлено на рис. 2.

Таблица 2

Результати парних порівнянь рівня субкритеріїв вхідних параметрів системи очищення (B_{x1} – B_{x8})

Критерії	«Схід-Руда», Жовті Води	Житлова забудова, с. Нова Гусарівка	Міська лікарня, м. Золочів
	W/вага	W/вага	W/вага
(B _{x1})	0,07611	0,1452	0,0877
(B _{x2})	0,1251	0,1724	0,1215
(B _{x3})	0,1107	0,1212	0,1191
(B _{x4})	0,1066	0,1316	0,1006
(B _{x5})	0,1066	0,1125	0,1085
(B _{x6})	0,1107	0,092	0,1324
(B _{x7})	0,1107	0,1046	0,1954
(B _{x8})	0,2536	0,1205	0,1349
<i>BY</i>	0,01	0,03	0,03
<i>IY</i>	0,02	0,04	0,04
λ_{\max}	8,0	8,0	8,0
W_{B3B}	1	1	1

Таблиця 3

Результати парних порівнянь рівня субкритеріїв вхідних параметрів системи очищення до підкритеріїв рівня вихідних умов (B_{x1} – B_{x8} до B_{ix1} – B_{ix4})

[illegible]

Таблиця 4

Результати парних порівнянь підкритеріїв рівня вихідних умов до обставин міста, де планується побудувати очисні споруди ($V_{\text{их}1}$ – $V_{\text{их}4}$ до ОМ1–ОМ5)

Критерії	«Схід-Руда», Жовті Води				Житлова забудова, с. Нова Гусарівка				Міська лікарня, м. Золочів			
	$V_{\text{их}1}$	$V_{\text{их}2}$	$V_{\text{их}3}$	$V_{\text{их}4}$	$V_{\text{их}1}$	$V_{\text{их}2}$	$V_{\text{их}3}$	$V_{\text{их}4}$	$V_{\text{их}1}$	$V_{\text{их}2}$	$V_{\text{их}3}$	$V_{\text{их}4}$
ОМ 1	0,1954	0,1097	0,1977	0,2236	0,2318	0,173	0,2226	0,2644	0,1938	0,2318	0,1489	0,173
ОМ 2	0,2293	0,2194	0,1314	0,2236	0,2226	0,2293	0,2318	0,1617	0,2335	0,2226	0,1681	0,173
ОМ 3	0,173	0,2194	0,2236	0,2236	0,1931	0,173	0,2002	0,1931	0,2049	0,1931	0,1989	0,2293
ОМ 4	0,2293	0,1939	0,2236	0,1314	0,2002	0,2293	0,1523	0,2012	0,174	0,2002	0,2307	0,1954
ОМ 5	0,173	0,2577	0,2236	0,1977	0,1523	0,1954	0,1931	0,1737	0,1938	0,1523	0,2534	0,2293
BY	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02
IY	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,02	0,04	0,04	0,03	0,01	0,04	0,02
λ_{max}	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
$W_{\text{взв}}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблиця 5

Результати парних порівнянь підкритеріїв рівня обставин міста, де планується побудувати очисні споруди, до рівня факторів, які впливають на вибір ТФ (ОМ1–ОМ5 до Ф1–Ф5)

Критерії	«Схід-Руда», Жовті Води					Житлова забудова, с. Нова Гусарівка					Міська лікарня, м. Золочів				
	ОМ 1	ОМ 2	ОМ 3	ОМ 4	ОМ 5	ОМ 1	ОМ 2	ОМ 3	ОМ 4	ОМ 5	ОМ 1	ОМ 2	ОМ 3	ОМ 4	ОМ 5
Ф 1	0,111 1	0,193 8	0,232 2	0,148 7	0,233 5	0,149 8	0,173 5	0,233 5	0,233 5	0,231 8	0,222 6	0,229 3	0,173 3	0,173 3	0,229 3
Ф 2	0,222 2	0,233 5	0,197 7	0,196 2	0,204 9	0,198 3	0,195 4	0,193 8	0,204 9	0,200 2	0,231 8	0,173 3	0,229 3	0,173 3	0,195 4
Ф 3	0,222 2	0,204 9	0,174 7	0,170 8	0,193 8	0,194 7	0,173 5	0,193 8	0,193 8	0,222 6	0,200 2	0,229 3	0,173 3	0,195 4	0,229 3
Ф 4	0,222 2	0,174 3	0,197 7	0,258 9	0,174 3	0,194 7	0,229 3	0,204 9	0,174 3	0,152 3	0,152 3	0,173 3	0,195 4	0,229 3	0,173 3
Ф 5	0,222 2	0,193 8	0,197 7	0,225 4	0,193 8	0,262 5	0,229 3	0,174 3	0,193 8	0,193 1	0,193 1	0,195 4	0,229 3	0,229 3	0,173 3
BY	0	0,03	0,01	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
IY	0	0,03	0,01	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02
λ_{max}	5,0	5	5	5,0	5,0	5,0	5,0	5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
$W_{\text{взв}}$	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2

Таблиця 6

Результати парних порівнянь підкритеріїв рівня факторів, які впливають на вибір ТФ до рівня альтернатив (Ф 1...5 до ТФ 1...4)

Критерії	«Схід-Руда», Жовті Води					Житлова забудова, с. Нова Гусарівка					Міська лікарня, м. Золочів				
	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 4	Ф 5	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 4	Ф 5	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 4	Ф 5
ТФ 1	0,395 2	0,246 3	0,395 2	0,297 9	0,157 1	0,246 3	0,246 3	0,246 3	0,209 6	0,157 1	0,168 2	0,142 9	0,140 4	0,246 3	0,169 2
ТФ 2	0,239	0,297 9	0,239	0,209 6	0,319 1	0,346 5	0,297 9	0,297 9	0,297 9	0,319 1	0,197 6	0,285 7	0,239	0,246 3	0,204 6
ТФ 3	0,197	0,209	0,197	0,246	0,281	0,203	0,209	0,246	0,246	0,281	0,239	0,285	0,230	0,297	0,287

	6	6	6	3		6	6	3	3			7	8	9	9
ТФ 4	0,168 2	0,246 3	0,168 2	0,246 3	0,242 8	0,203 6	0,246 3	0,209 6	0,246 3	0,242 8	0,395 2	0,285 7	0,339 7	0,209 6	0,338 3
ВУ	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0	0,02	0,02	0,02
ІУ	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0	0,02	0,02	0,02
λ_{\max}	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,00
$W_{\text{ВЗВ}}$	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

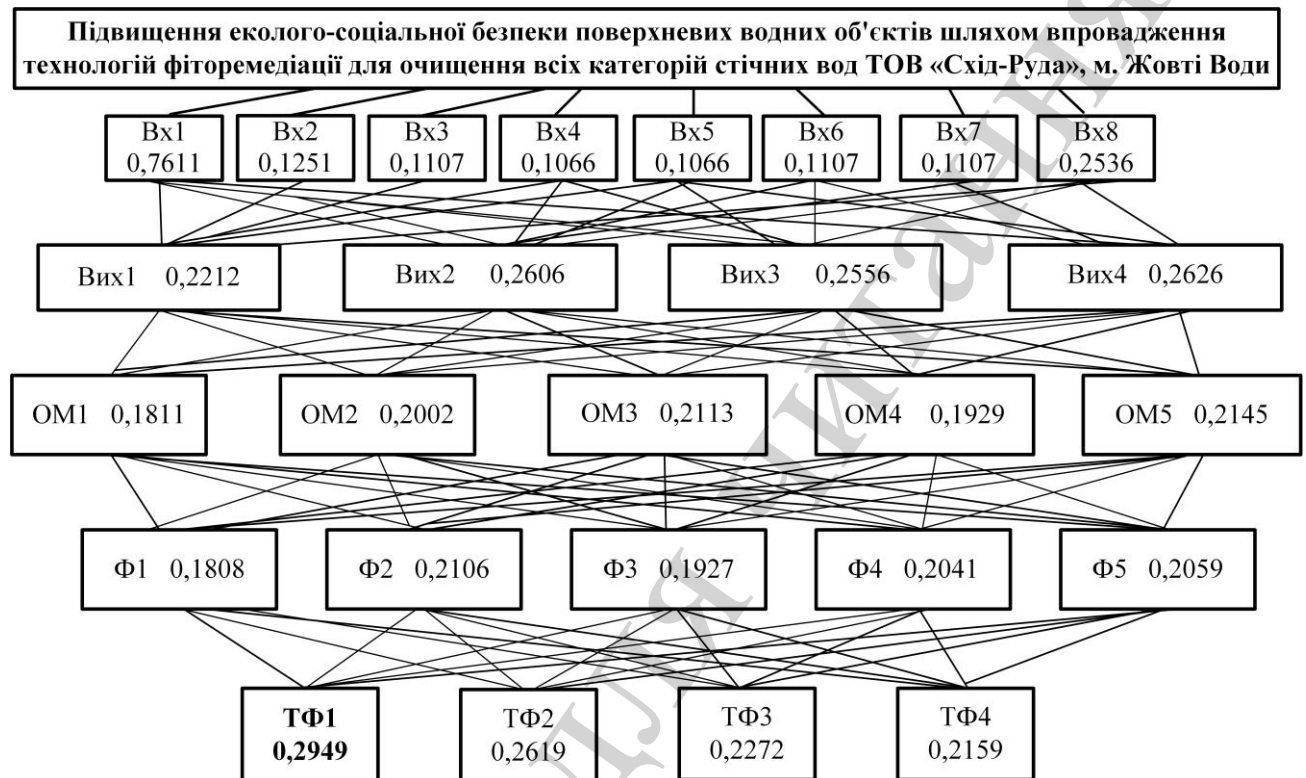


Рис. 2. Ієрархія вибору найбільш еколого-соціально безпечної ТФ для підприємства ТОВ «Схід-Руда», м. Жовті Води

Загальна оцінка узгодженості (ІУ) ієрархії: $0,02696 < 0,1$ ($0,1$ – критичне значення показника узгодженості. Менше значення оцінки свідчить про достовірність отриманих даних [10, 11]). Найбільше значення глобального пріоритету ($0,2949$) отримала ТФ1 – ботанічні майданчики.

За рис. 2 можливо простежити зміну поточних пріоритетів по спадній ієрархії по промисловому об'єкту.

Вхідні параметри стічних вод знаходяться на однаковому порівняльно низькому рівні, крім їх інтенсивності руху ($B_{x1}=0,7611$) та кількості радіоактивних елементів ($B_{x8}=0,2536$). Їх вплив на різні види поверхневих водних об'єктів (3-й рівень ієрархії) можливо признати однаковим.

Для забезпечення очищення вод зі зазначеними параметрами необхідні значні капітальні витрати (можливості фінансування $ОМ5=0,2145$), які можуть бути зменшені при наявності достатнього ухилу місцевості ($ОМ2=0,2002$) та значної глибини залягання рівня ґрунтових вод ($ОМ3=0,2113$).

Всі фактори 5 рівня ієрархії – конструктивні та експлуатаційні вимоги до ТФ – надають приблизно однаковий вплив на вибір пріоритетної технології (ТФ1 – ботанічні майданчики), крім фактору – доступність ВВР. Для нього величина локального пріоритету всього $\Phi_1=0,1811$.

За результатами проведеного дослідження в якості ботанічного майданчика експерти запропонували використовувати колишнє хвостосховище гірничо-збагачувального комбінату. Його поверхня повністю покрита ВВР: очеретом та рогозом. Дамби, які розділяють хвостосховище на окремі ділянки, відсипані ущільненим суглинком. По периметру хвостосховища – обвідний канал для перехоплення поверхневого стоку. Хвостосховище повинно приймати шахтні води в обсязі 250–400 м³/годину при наявності підвищеного вмісту радіонуклідів та здійснювати їх очищення до норм якості води комунально-побутового призначення.

Результати розрахунків для житлової забудови, с. Нова Гусарівка представлено на рис. 3. Загальна оцінка узгодженості (IY) для ієрархії: $0,02707 < 0,1$. У відповідності до чисельних значень глобальних пріоритетів найбільше значення, з досить незначним відривом від інших технологій, отримала ТФ2 (0,3122) – біоінженерна споруда.

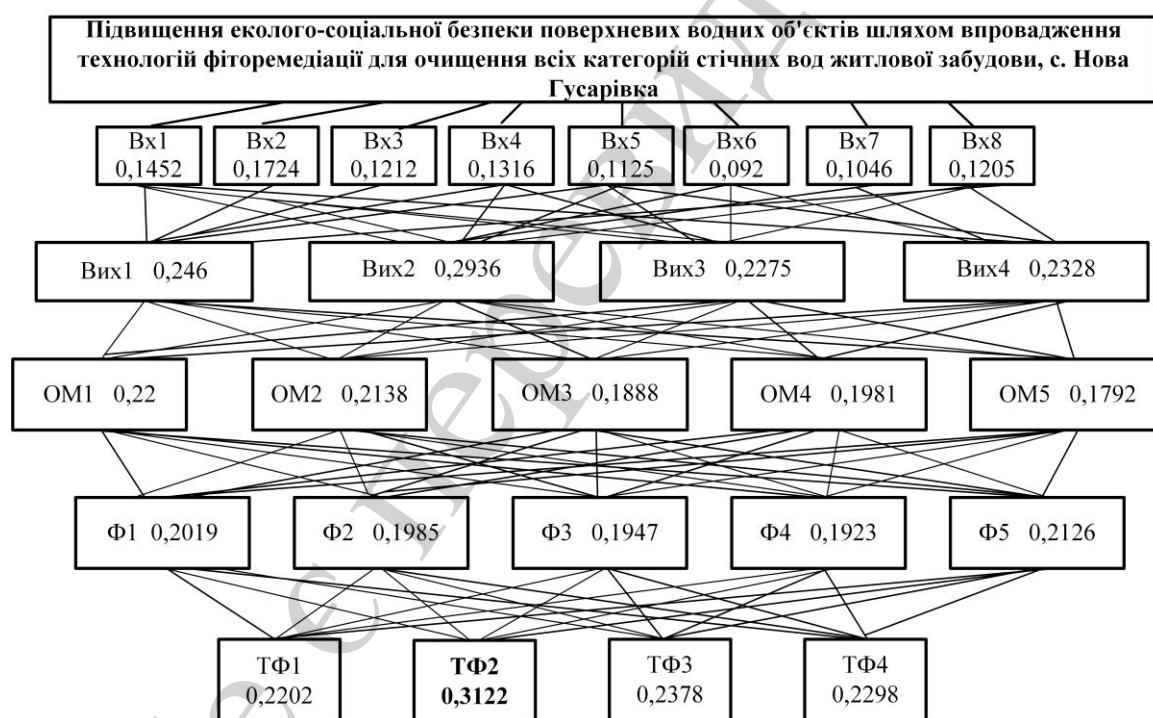


Рис. 3. Ієрархія вибору найбільш еколого-соціально безпечної ТФ житлової забудови, с. Нова Гусарівка

Зміну поточних пріоритетів по спадній ієрархії по конкретній житловій забудові можливо прослідити на рис. 3.

Характерними вхідними параметрами стічних вод для такого об'єкту є значні величини рН, ХСК і БСК ($Vx_2=0,1724$), кількість нафтопродуктів ($Vx_4=0,1316$) та звислих речовин ($Vx_3=0,1212$). Крім того, слід відмітити наявність на об'єкті істотного значення руху стічних вод ($Vx_1=0,1452$). Даний склад

параметрів найбільш негативний вплив може оказувати на водойми рибогосподарського призначення ($V_{\text{их}2}=0,2936$).

Успішному розміщенню очисних споруд на об'єкті будуть сприяти два істотних фактори: ОМ1 – наявність вільної площі для будівництва ($ОМ1=0,2200$) та ОМ2 – наявність ухилу місцевості ($ОМ2=0,2138$).

Із факторів конструктивних та експлуатаційних вимог до ТФ виділяється можливість роботи без значних експлуатаційних витрат ($Ф5=0,2138$). Останні фактори 5-го рівня ієрархії надають приблизно однаковий вплив на вибір пріоритетної технології (ТФ2 – біоінженерна споруда).

Експерти запропонували розмістити біоінженерну споруду на ділянці, що не має твердого покриття і у даний час не використовується у господарстві. Схема й основні конструктивні параметри вписуються в існуючі ландшафтні умови.

Вибрана технологія забезпечить екологічно прийнятний результат по очищенню забруднених вод, дає можливість безпечно відводити стічні води. Високі показники очищення на біоінженерних спорудах забезпечуються за рахунок його здійснення як в горизонтальній площині – через зарості ВВР, так і у вертикальній – через прошарок фільтруючої (щебінь, пісок) товщі, яка насичена кореневищами рослин, мікрофлорою та водоростями.

Результати розрахунків для міської лікарні, м. Золочів, представлено на рис. 4. Загальна оцінка узгодженості (IY) ієрархії: $0,01806 < 0,1$. Найбільше значення глобального пріоритету ($0,3159$) отримала ТФ4 – комбінування технологій.

За рис. 4 простежимо зміну поточних пріоритетів по спадній ієрархії по лікарні.

Вхідні параметри стічних вод мають істотне бактеріальне забруднення ($V_{\text{х}7}=0,1954$). Крім того, слід відмітити забрудненість вод поверхнево-активними речовинами ($V_{\text{х}6}=0,1324$) та радіоактивними елементами ($V_{\text{х}8}=0,1349$). А ось режим руху стічних вод на даному об'єкті дуже не значний ($V_{\text{х}1}=0,0877$). Даний склад параметрів найбільш негативний вплив може оказати як на водойми рибогосподарського ($V_{\text{их}2}=0,2636$), так і комплексного ($V_{\text{их}4}=0,2538$) призначення.

Суттєвий негативний вплив на будівництво очисних споруд на об'єкті можуть оказати два фактори: незначна глибина залягання рівня ґрунтових вод ($ОМ3=0,2066$) та можлива відсутність достатнього фінансування ($ОМ5=0,2059$).

Конструктивні та експлуатаційні вимоги до ТФ (фактори 5-го рівня ієрархії) надають приблизно однаковий вплив на вибір пріоритетної ТФ (ТФ4 – комбінування технологій), крім фактору – вимоги до товщини ґрунтового фільтру в основі. Для нього величина локального пріоритету всього $Ф4=0,1850$. Дійсно, суттєве зменшення бактеріальне забруднення в даному випадку, не залежить від товщиною фільтруючої товщі. Це може бути досягнуто тільки за рахунок використання ВВР.

Для очищення стічних вод від лікарні, перед скиданням їх до існуючої гідромережі, експерти запропонували збудувати (пристосувати) цілий каскад розташованих один за одним трьох відстійників і двох БІС (комбінування технологій). Даний захист забезпечить припинення надходження до водного об'єкту, в першу чергу, бактеріального забруднення. Воно, а також завислі речовини, бу-

дуть перероблятися при повільному режимі руху СВ біоценозом у відстійниках та БІС за рахунок біохімічних процесів, які відбуваються у клітинах ВВР, водоростей та мікроорганізмів, що сприяє нарощуванню їх біомаси. Частина речовин буде потрапляти до кореневої системи ВВР (очерету), як речовини запасу, і буде використовуватися для самовідновлення фітоценозів у наступному вегетаційному циклі.

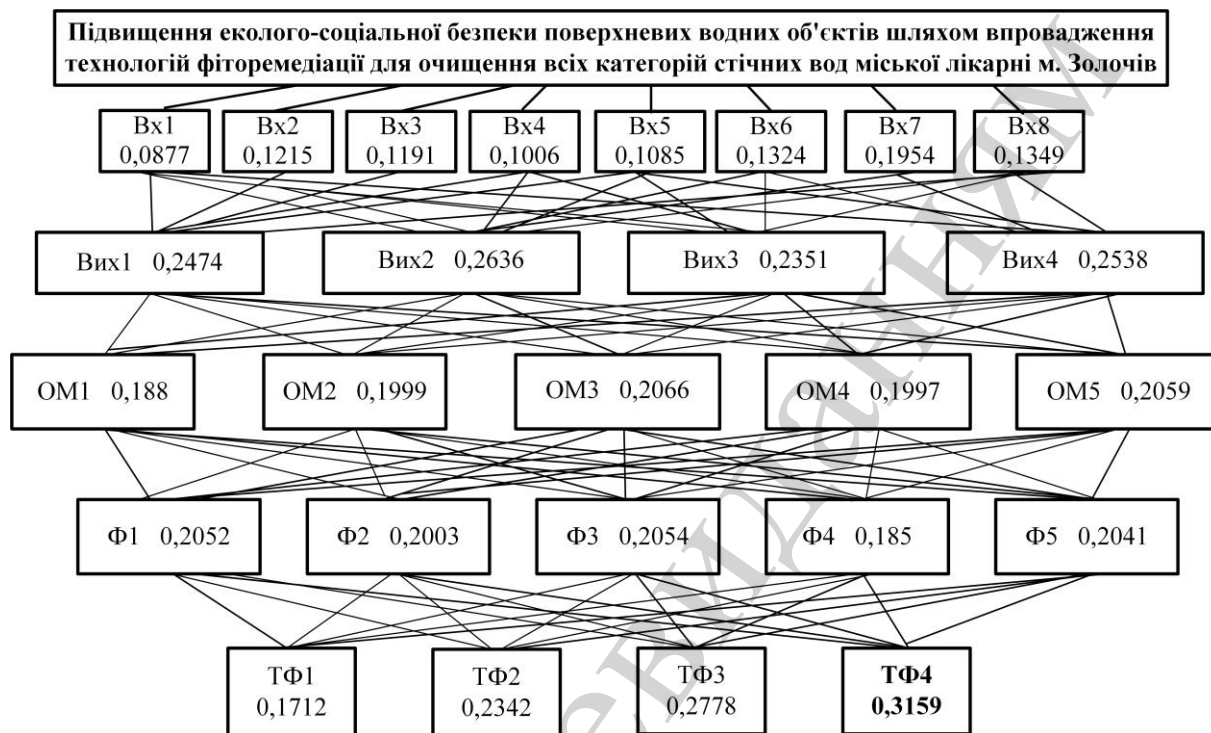


Рис. 4. Ієрархія вибору найбільш еколого-соціально безпечної ТФ міської лікарні, м. Золочів

В незалежності від реалізованої в проекті очисних споруд технології фітореMediaції, після здачі їх в експлуатацію, вони повинні залишатися під наглядом спеціалістів щодо оптимізації угруповань ВВР. Потрібна ступень очищення стічних вод досягається при виході споруд на запроектовану потужність, як правило цей період складає близько 2 років. Тривалість пусконаладжувального періоду залежить від розвитку у них ВВР. Цей період необхідний для нарощування рослинами підземної та надземної біомаси, від яких залежить площа покриття рослинами акваторії споруд. Найбільша ступінь очистки досягається при формуванні щільних заростей рослин із значною чисельністю та 100 % площею покриття ВВР у спорудах.

6. Обговорення результатів дослідження розробленого методичного підходу

Основним результатом при розробці методичного підходу є сформована ієрархічна модель порівняння елементів задачі (рис. 1). Вона відображає особливості процесу водовідведення, на відміну від моделі, яка наведена для водопостачання у [9]. Крім того, зазначена модель враховує не тільки особливості

технологій фіторе mediaції, в основному біологічні, але і умови конкретних об'єктів населених пунктів, їх екологічні, соціальні, економічні та територіальні складові. Використання розширеного обсягу інформації при розробці рішень збільшує об'єктивність їх обґрунтування.

Наведений результат став можливим завдяки методу МАІ. За ним складна вихідна задача поділена на ряд простих і це дає можливість працювати експертам різного фахового спрямування. При цьому експерти можуть спиратися як на свій досвід та інтуїцію, так і на наявні об'єктивні дані (безпосередні виміри, прогнози та статистичні оцінки).

Неможливо було розробити методичний підхід без уточнення даних по самим ТФ. У [1, 2] вводяться поняття тільки 3-х з них: ботанічні майданчики, біоінженерні споруди та біоплато та показані особливості їх конструктивної реалізації. У цій роботі (табл. 1) до переліку ТФ додається четверта – комбінування технологій. Крім того, по кожній технології сформовані переваги та недоліки, які дозволили проводити їх порівняння.

Сформована ієрархічна модель може застосовуватися багаторазово. Залишається лише наповнювати її даними експертів від різних об'єктів. При необхідності структура моделі може бути скорегована.

Апробація розробленого методичного підходу проведена за трьома різними об'єктами населених пунктів: промисловому об'єкті, житловій забудові та лікарні. Їх дані по пріоритетах елементів 2-го (вхідні параметри СВ) та 3-го (вимоги до стану ПВО, в які будуть надходити стічні води після очищення, та рівень проблем мешканців, що проживають біля водойми і використовують її води) рівнів ієрархії можуть служити орієнтирами при дослідженні аналогічних проектів.

За всіма досліджуваними об'єктами показник рівня узгодженості як для окремих матриць, так і для всієї ієрархії, показали результати значно нижче критичного рівня ($<0,1$) (табл. 2–6). Отриманні результати перевірки свідчать про достовірність використаних експертних даних та коректність рішення задачі по вибору пріоритетної технології фіторе mediaції по кожному об'єкту. Крім того, по об'єктам отримана нова інформація – співвідношення пріоритетів елементів рішення по спадним рівням ієрархії. Результати цього аналізу необхідні у випадку проведення варіювання параметрами очисних споруд при їх проектуванні.

Обмеженням у використанні розробленого методичного підходу можуть бути певні складнощі при обґрунтуванні рішень, зокрема, для організації проведення досліджень обов'язково необхідно залучати підготовлену групу спеціалістів. Їй потрібно виконувати наступне: проводити відбір експертів, ставити їм завдання на дослідження, організовувати проведення процедури парних порівнянь, виявляти суперечності в даних, тощо. Цей недолік можливо компенсувати шляхом багаторазового залучення цієї групи для рішення типових завдань. Чим більш об'єктів, по яким буде працювати група, тим більшим буде її досвід у використанні підходу, тобто застосування підходу стає більш ефективним.

Напрямки розвитку даного дослідження:

– у МАІ є можливість перевірки експертної інформації на несуперечність за допомогою індексу і відносини узгодженості як для окремих матриць, так і для всієї ієрархії. З'являються більш удосконалені програмні засоби, що реалізують

MAI (Expert Choice, ПРАІС), які передбачають додаткову можливість виявлення найбільш неузгоджених суджень експертів. Перехід на використання цих програмних засобів дасть можливість підвищити ефективність роботи з експертами, що дозволить підвищити рівень обґрунтованості управлінських рішень;

– необхідно проводити ретельний аналіз кожної апробації розробленого методичного підходу та за його результатами постійно здійснювати удосконалення запропонованого інструменту дослідження.

6. Висновки

1. Сформована ієрархічна модель із факторів, які впливають на вибір пріоритетної технології фіторемедіації, та розкрит порядок її аналізу за МАІ. Зазначена модель враховує не тільки особливості технологій фіторемедіації (в основному – біологічні), але і умови конкретних об'єктів населених пунктів, їх екологічні, соціальні, економічні та територіальні складові. Використання розширеного обсягу інформації при виробітку рішень збільшує об'єктивність їх обґрунтування. Сформована ієрархічна модель може застосовуватися багаторазово. Залишається лише наповнювати її даними експертів від різних об'єктів. При необхідності структура моделі може бути скорегована.

2. Апробація розробленого методичного підходу проведена за трьома різними об'єктами населених пунктів: промисловому об'єкті, житловій забудові та лікарні. По них отримані:

- пріоритетні технології фіторемедіації для впровадження на об'єкті;
- результати аналізу пріоритетів елементів рішення по спадним рівнями ієрархічної моделі, що дозволяє зрозуміти, як отримано те або інше значення цих рішень. Ці результати необхідні у випадку проведення варіювання параметрами очисних споруд при їх проектуванні.

За всіма досліджуваними об'єктами розраховувався показник рівня узгодженості як для окремих матриць, так і для всієї ієрархії. У всіх випадках значення показника отримані нижче критичного рівня ($<0,1$). Ці результати перевірки свідчать про достовірність використаних експертних даних та коректність рішення задачі по вибору пріоритетної технології фіторемедіації по об'єктах.

Література

1. Beans, C. (2017). Core Concept: Phytoremediation advances in the lab but lags in the field. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (29), 7475–7477. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1707883114>
2. Дмитрієва, О. О., Телюра, Н. О., Василенко, В. П. (2018). Впровадження екологічно безпечного водовідведення, як елемент сталого розвитку населених пунктів України. *Комунальне господарство міст*, 7 (146), 174–179. doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2018-7-146-174-179>
3. Arthur, E. L., Rice, P. J., Rice, P. J., Anderson, T. A., Baladi, S. M., Henderson, K. L. D., Coats, J. R. (2005). Phytoremediation – An Overview. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24 (2), 109–122. doi: <https://doi.org/10.1080/07352680590952496>

4. Comín, F. A., Sorando, R., Darwiche-Criado, N., García, M., Masip, A. (2014). A protocol to prioritize wetland restoration and creation for water quality improvement in agricultural watersheds. *Ecological Engineering*, 66, 10–18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.059>
5. Verhoeven, J. T. A. (2014). Wetlands in Europe: Perspectives for restoration of a lost paradise. *Ecological Engineering*, 66, 6–9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.03.006>
6. Sumiahadi, A., Acar, R. (2018). A review of phytoremediation technology: heavy metals uptake by plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 142, 012023. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/142/1/012023>
7. Ghanem, H., Chalak, L., Baydoun, S. (2019). Phytoremediation of Lebanese polluted waters: a review of current initiatives. *MATEC Web of Conferences*, 281, 03007. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928103007>
8. Maiga, Y., von Sperling, M., Mihelcic, J. (2017). Constructed Wetlands. *Global Water Pathogen Project*. doi: <https://doi.org/10.14321/waterpathogens.66>
9. Morley, M. S., Vitorino, D., Behzadian, K., Ugarelli, R., Kapelan, Z., Coelho, S. T., Do Céu Almeida, M. (2015). Decision support system for the long-term city metabolism planning problem. *Water Supply*, 16 (2), 542–550. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2015.167>
10. Saaty, T. L., Ergu, D. (2015). When is a Decision-Making Method Trustworthy? Criteria for Evaluating Multi-Criteria Decision-Making Methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 14 (06), 1171–1187. doi: <https://doi.org/10.1142/s021962201550025x>
11. Саати, Т. Л. (1993). Принятие решений: Метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь, 278. URL: <http://pqm-online.com/assets/files/lib/books/saaty.pdf>
12. Maksimenko, O., Pancheva, H., Madzhd, S., Pysanko, Y., Briankin, O., Tykhomyrova, T., Hrebenuk, T. (2018). Examining the efficiency of electrochemical purification of storm wastewater at machine-building enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (96)), 21–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150088>
13. Isaienko, V., Madzhd, S., Pysanko, Y., Nikolaiev, K., Bovsunovskyi, E., Cherniak, L. (2019). Development of a procedure for determining the basic parameter of aquatic ecosystems functioning – environmental capacity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (97)), 21–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.157089>